ISSN 1561-5359. Штучний інтелект, 2020, № 2

УДК 004.932

П.Ю. Сабельніков, Ю.А. Сабельніков
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Україна
пр. Академіка Глушкова, 40, м. Київ, 03187

ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ АВТОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СМАРТФОНА

P.Yu. Sabelnikov, Yu.A. Sabelnikov
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Ukraine
40, Academician Glushkov St., Kyiv, 03187

TECHNOLOGY FOR DETERMINING THE SPEED OF CARS USING A SMARTPHONE

У статті досліджено й встановлено можливість застосування смартфона з інтегрованим комплексом необхідних технічних засобів (кілька відеокамер, акселерометри, гіроскоп, магнітометр, GPS-датчик, засоби бездротового зв'язку GSM і Wi-Fi) для реалізації технології відеофіксації швидкості транспортних засобів. Запропоновано основні алгоритмічні й програмні компоненти смартфона, які дозволяють виявляти й супроводжувати транспортний засіб, а також визначати його швидкість. Установка й первісне настроювання приладу є простим. Варто лише виміряти й ввести в прилад висоту його розташування. У статті досліджено й встановлено можливість застосування смартфона з інтегрованим комплексом необхідних технічних засобів для реалізації технології відеофіксації швидкості транспортних засобів (ТЗ). Смартфон має низькі вартість і енергоспоживання, можливість роботи в необхідному діапазоні температур, а також комплекс фізично вбудованих необхідних технічних засобів: декілька відеокамер, акселерометри, гіроскоп, магнітометр, GPS-датчик, засоби бездротового зв'язку GSM і Wi-Fi. Завдяки низькому енергоспоживанню він може також працювати від сонячних батарей у денний час, за відсутності інших джерел електроживлення. Вартість смартфона з дуже гарними характеристиками не перевищує 10 тисяч гривень. У роботі запропоновано основні компоненти алгоритмічного забезпечення приладу. Використання для реалізації супроводу методу Лукаса-Канаде й обчислення в міжпіксельному просторі координат точок траєкторії руху ТЗ дозволить підвищити точність вимірюван-ня пройденого шляху та швидкості ТЗ на коротких ділянках траєкторії руху. Запропонований алгоритм об-числення швидкості ТЗ вимагає введення тільки одного параметра – висоти розташування приладу. Тому установка й первісне настроювання приладу є простим. Варто лише виміряти й ввести в прилад цей параметр. Широкомасштабне впровадження приладу, побудованого на базі смартфона, для вимірювання швидкості ТЗ можливе за рахунок відносно невеликих інвестицій у розробку його механічної частини, алгоритмічного й програмного забезпечення.
Ключові слова: смартфон, комп’ютерний зір, обробка зображень, визначення швидкості автомобілів

In the article the possibility of using a smartphone with an integrated set of necessary technical means (several video cameras, accelerometers, gyroscope, magnetometer, GPS sensor, GSM and Wi-Fi wireless communication) for implementing the technology of video recording of vehicle speed is investigated and established. The main algorithmic and software components of a smartphone are proposed, which allow to identify and to accompany a vehicle, as well as to determine its speed. Installation and initial setup of the device is simple. It is only necessary to measure and enter in the device height of its arrangement. In the article the possibility of using a smartphone with an integrated set of necessary technical means for implementing the technology of video recording of vehicle speed is investigated and established. The smartphone has a low cost and power consumption, the ability to operate in the required temperature range, as well as a set of physically built-in necessary technical means: several video cameras, accelerometers, gyroscope, magnetometer, GPS sensor, GSM and Wi-Fi wireless communication. Due to its low power consumption, it can also run on solar panels during the day when no other power source is available. The cost of a smartphone with very good characteristics does not exceed 10,000 UAH. The paper proposes the main components of the algorithmic support of the device. The use of the Lucas-Kanade method for the implementation of tracking and the calculation in the interpixel space of the coordinates of the points of the vehicle's trajectory will improve the accuracy of measurements of the traveled distance and the vehicle's speed on short sections of the trajectory. The proposed algorithm for calculating the vehicle speed requires entering only one parameter - the height of the device. Therefore, installation and initial setup of the device is simple. It is enough to measure and enter this parameter into the device. Large-scale introduction of a device for measuring vehicle speed, built on the basis of a smartphone, is possible due to relatively small investments in the development of its mechanical part, algorithmic and software.
Key words: smartphone, computer vision, image processing, car speed determination

Вступ

Сьогодення потребує активного розвитку систем транспортного моніторингу, призначених для контролю магістралей, збору параметрів автомобільного потоку (склад, середня швидкість, щільність потоку й т. п.), фіксації фактів порушення швидкісного режиму та інших правил дорожнього руху [1] з метою зменшення кількості дорожньо-транспортних порушень (ДТП).

Безліч усіх методів детектування транспортних засобів, що перетинають дорожню ділянку, можна умовно розділити на дві групи [2]: «інвазивні» й «неінвазивні».

«Інвазивні» методи передбачають втручання в дорожнє покриття за допомогою вбудовування технічних приладів.

«Неінвазивні» методи дозволяють використовувати апаратуру, встановлену в межах видимості дорожньої ділянки, а також програмне забезпечення для оброб-ки інформації, що надходить.

Найпоширенішими «неінвазивними» рішеннями для вимірювання швидкостей автомобілів є локаційні радари та лазерні вимірювачі. Перевагами даних пристроїв прийнято вважати високу точність визначення швидкості (помилка не більше 2 км/год) і дальність дії (300−500 м). Однак потрібно мати на увазі, що радари та лазерні вимірювачі забезпечують декларовані параметри, якщо транспортний засіб (ТЗ) рухається точно за напрямком на них. При встановленні приладів над магістраллю, або збоку від неї, необхідно враховувати їхні кутові положення.

До «неінвазивних» рішень також відносяться системи, які в процесі детектування обробляють потік відеоданих. Системи відеодетектування реалізуються програмно на сервері обробки потоку відеоданих або інтегруються безпосередньо в камеру, оснащену програмованим сигнальним процесором. Процесори дозволяють визначити присутність об'єкта в межах смуги руху, обчислити його розмір, класифікувати об'єкт на підставі співвідношення його довжини й ширини. У зазначених системах також може бути використана додаткова інформація, що надходить із різних датчиків (наприклад, дані з GPS дозволяють визначити положення камери на мапі міста). У системах відеодетектування, як правило, реалізуються методи пошуку простих об'єктів, які є частинами транспортних засобів, наприклад, реєстраційних номерів або коліс. Як наслідок, висуваються певні вимоги до роздільної здатності відеокамер та їхнього розташування на дорозі.

Основне обмеження відеодетекторів – вплив візуальних умов зйомки (освітлення, сезонні зміни фону) на якість пошуку об'єктів. Однак слід врахувати, що за будь-яких технічних рішень відеокамери є невід'ємною частиною приладів моніторингу транспортних потоків, оскільки без фотореєстрації результати фіксації порушень, у тому числі перевищення швидкості, не є легітимними. Недоліком комбінованих приладів (фотореєстратор плюс радіолокаційний вимірник швидкості) є відсутність жорсткого зв'язку між результатами вимірювання й ТЗ, який фотографують відеокамерою. Випромінювання НВЧ-енергії також легко виявляється антирадарами.

Природнє бажання розробників систем транспортного моніторингу полягає в тому, щоб підвищити відмовостійкість і якість роботи системи при зниженні вартості й складності апаратного забезпечення для їх масового використання. Пріоритетним напрямком досліджень є створення нових і адаптація існуючих методів відеодетектування.

Від 1 червня в Україні задіяно систему відеофіксації порушень правил дорожнього руху (ПДР) [3]. Порушення на дорогах реєструють камери українського виробництва «КАСКАД» від підприємства «Українські системні інновації». Вартість однієї такої камери становить 970 тис. грн. На придбання 50 камер держава витратила 54 млн грн.

Камера «КАСКАД» здатна фіксувати номери ТЗ з реєстрацією в Україні, Молдові, ЄС, Росії та Білорусі при швидкості руху до 240 км/год на відстані 20-50 метрів на трьох смугах руху шириною 10,5 м. Для

цього використовуються технології комп'ютерного зору на основі нейронних мереж. Зібрані камерами дані зберігаються й обробляються на серверах МВС.

Для обґрунтованості доказової бази, «КАСКАД» [4] вимірює швидкість відразу двома каналами: класичним радаром і за допомогою програмного забезпечення відеокамери, яке попіксельно обчислює швидкість руху захопленого в кадрі об'єкта. "Каскади" оснащені інфрачервоним прожектором. Це дозволяє не засліплювати водіїв у нічний час доби та розпізнавати символи навіть на тих номерах, які були спеціально вкриті світловідбівним лаком. Комплекс може фіксувати декілька порушників одночасно, формуючи для кожного авто окремий пакет метаданих і інформаційних файлів. Окрім самих фото-, відеодоказів, документ містить інформацію про точну геолокацію вимірювального приладу, час фіксації та вид виявленого порушення (поки що МВС планує фіксувати тільки перевищення швидкості, хоча функціонал комплексу набагато ширший).

Як працює система відеофіксації порушення ПДР

Після того, як камера зафіксувала перевищення швидкості, ця інформація потрапляє в автоматичну систему електронної фіксації порушень МВС. Патрульний поліцейський перевіряє, на кого зареєстрований транспортний засіб. Після цього він формує постанову про порушення й додає електронний підпис.

Постанова автоматично направляється у відділення за місцем реєстрації транспортного засобу, де її друкують і відправляють адресатові не більш, ніж за три дні.

Штраф надходить власникові автомобіля (або його користувачу, якщо дані про нього занесені до реєстру). Штраф за машину з іноземними номерами оплачує той, хто ввіз її на територію України.

Оскільки даною технологією передбачається ухвалення остаточного рішення після візуального порівняння оператором відеодоказів з даними з офіційних реєстрів, автоматичне розпізнавання номерів не є важливим і необхідним компонентом. Після отримання даних про порушення, оператор може розпізнати номер автомобіля з фото й ввести його в систему для отримання даних реєстрів, що, в принципі, передбачається процедурою, якщо розпізнавання не спрацювало. Тобто основним найважливішим компонентом системи є автоматичне виявлення й визначення швидкості ТЗ.

У даній статті висвітлено результати дослідження можливості застосування ***смартфона*** як приладу відеофіксації швидкості ТЗ. Це має бути смартфон із комплексом вбудованих технічних засобів, що включають декілька відеокамер, і відповідним алгоритмічним та програмним забезпеченням для повноцінної реалізації розглянутої вище технології. Основну перевагу запропонованого рішення становить те, що вартість смартфона з дуже гарними характеристиками не перевищує 10 тис. грн.

Вимірювання швидкості ТЗ за допомогою засобів комп'ютерного зору

Застосування систем комп'ютерного зору (СКЗ) дозволяє виключити додаткову апаратуру, одночасно вимірювати швидкості всіх автомобілів у полі зору камери та забезпечити однозначний зв'язок між результатом вимірювання й конкретним об'єктом. Розглянемо два можливі варіанти СКЗ, побудовані із застосуванням стерео- або моновідеокамери.

У випадку застосування стереовідеокамери, систему координат місцевості $\{X_M, Y_M, Z_M\}$ розглядають так, що лінія візування першої відеокамери приймається за вісь Z_M, лінія, яка з'єднує точки фокуса обох камер, − за вісь Y_M, а вісь X_M проходить через оптичний центр першої відеокамери й перпендикулярна площині, утвореної осями Y_M, X_M. Знаючи фізичну відстань між точками фокуса відеокамер, методами стереозору за координатами ($x1_a, y1_a$) і ($x2_a, y2_a$) деякої точки *A* об'єкта на зображеннях обох відеокамер, можна розрахувати у фізичному просторі координати об'єкта, який перебуває в полі їх зору. Нехай за час суп-

роводу Δt об'єкт переміщається в просторі прямолінійно із точки A у точку B. Тоді швидкість v може бути розрахована як евклідова відстань між цими точками з координатами (X_A, Y_A, Z_A) і (X_B, Y_B, Z_B), ділена на час Δt.

$$v = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (X_A - X_B)^2 + (X_A - X_B)^2} \; / \Delta t \, .$$

У [1] розглянуто декілька методів визначення швидкості ТЗ для випадку застосування моновідеокамери. Один з методів полягає в тому, що за допомогою фарби на дорозі відзначають контрольну зону з фіксованими лінійними розмірами. Цю ділянку автоматично визначають на відеокадрі, формують зону в площині растра з установленими розмірами та здійснюють прив'язку координат растра камери до реальних координат на дорозі. Швидкість визначають за допомогою вимірювання часу (у кадрах), за який автомобіль перетнув розмічену зону. Варіант іншого підходу – нанесення серії ліній розмітки в площині телевізійного кадра. Визначають відстань, пройдену автомобілем за фіксований час із моменту початку супроводу. Необхідність нанесення маркерів на дорожнє полотно та прив'язки камери до місцевості ускладнює процес установки системи. На момент фіксації перетинання автомобілем границі контрольної зони впливає висота ТЗ. Висока вантажівка покине зону контролю раніше, ніж це зафіксує камера, через те, що деякий час оптична вісь камери буде перетинати верхню частину автомобіля, який уже виїхав за межі контрольної ділянки. Іншими причинами похибок є помилки дискретизації в часі та просторі. Сучасні відеокамери, звичайно, працюють із частотою кадрів 25 Гц. При фіксації моменту перетинання лінії розмітки можлива помилка до 40 мс. Внаслідок просторової дискретизації відеозображення момент перетинання лінії розмітки пікселя можна зафіксувати з точністю ±1 піксель.

Інший метод заснований на добуванні даних про збільшення розміру ТЗ. Для обчислення v_z – складової швидкості ТЗ у напрямку на камеру, необхідно зафіксувати початок дистанції супроводу L_1 і отримати дані про відносне збільшення розміру зображення автомобіля k за час Δt. Автомобіль, що має горизонтальний розмір d_0, наближається до камери. На відстані до камери L_1 горизонтальний розмір його проєкції на сенсорі відеокамери – d_1, на відстані L_2 – d_2. Очевидні такі співвідношення:

$$L_1 \approx f \cdot d_0 / d_1 \, ,$$

$$k = d_2 / d_1 = L_1 / L_2 = L_1 / (L_1 - \Delta L) \, ,$$

$$k = L_1 / (L_1 - v_z \cdot \Delta t) \, ,$$

$$v_z = (k-1) \cdot L_1 / \Delta t \cdot k \, .$$

де f – фокусна відстань об'єктива; k – коефіцієнт збільшення розміру проєкції автомобіля; ΔL – відстань, пройдена автомобілем зі швидкістю v_z за час Δt. У цій роботі також наведені співвідношення для обчислення складових швидкості по інших координатах. Основний недолік методу – низька точність визначення габаритів ТЗ і, відповідно, точність обчислення k.

Вимірювання швидкості ТЗ з використанням смартфона

У рамках системи щодо визначення швидкості ТЗ із використанням смартфона за пропонованою технологією розглянемо взаємозалежні системи координат місцевості $\{X_M, Y_M, Z_M\}$ і сенсора $\{x, y, z\}$, які зображені на рис. 1, де:

- відеокамера розташована на певній висоті h і її лінія візування, представлена віссю z, перпендикулярна площині сенсора, проходить через його центр і спрямована приблизно уздовж лінії дороги. Відповідно, площина, утворена осями $\{X_M, Y_M\}$, являє собою площину дороги, а вісь X_M – її приблизний напрямок;
- A – об’єкт, позначений точкою на площині дороги;
- осі H і z проходять через точку фокуса O відеокамери й разом з осями Z_M, X_M і x лежать в одній площині;
- уздовж осей H і Z_M діє сила тяжіння Землі;

- координати (X_A, Y_A) і (x_a, y_a) є відповідно координатами точки A об'єкта на місцевості та її проєкції a на сенсорі відеокамери;
- f – фокусна відстань відеокамери;
- α – кут між віссю z і лінією проєкції ($X_A - x_a$);
- β – кут нахилу осі z стосовно осі H;
- μ – кут між лінією проєкції ($X_A - x_a$) і лінією проєкції ($A - a$).

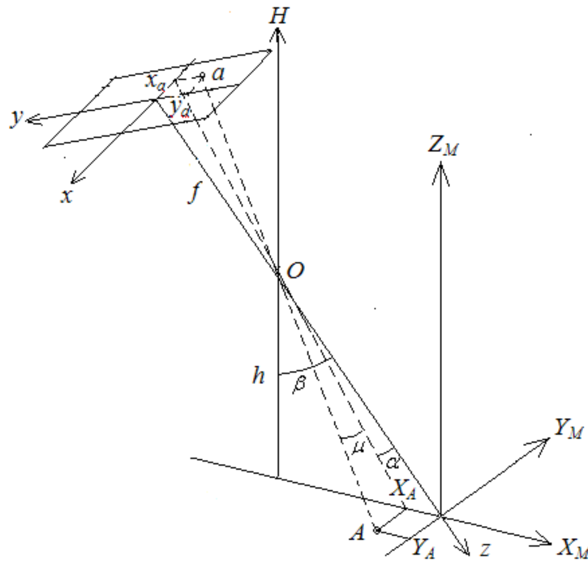


Рис. 1. Схема для обчислення координат точки на плоскій поверхні місцевості

У загальному випадку відеокамера може бути трохи повернена на кут γ навколо лінії візування z, тобто вісь x не лежить в одній площині з осями H, Z_M, X_M і z. Однак, знаючи γ, можна перетворити координати проєкції точки об'єкта за допомогою функції повороту, що буде відповідати повороту координатної сітки сенсора щодо даної точки. При цьому вісь x виявиться в одній площині з осями H, Z_M, X_M і z. Це здійснюється в такий спосіб. Нехай координати точки до повороту дорівнюють $\{x_a^*, y_a^*\}$, тоді:

$$x_a = x_a^* \cdot \cos\gamma - y_a^* \cdot \sin\gamma,$$

$$y_a = y_a^* \cdot \cos\gamma + x_a^* \cdot \sin\gamma.$$

Також слід врахувати, що обрана точка на об'єкті може лежати трохи вище площини дороги. Для компенсації погрішності для розрахунків можна зробити корекцію висоти h або зневажити похибкою, якщо висота точки об'єкта над поверхнею значно менше h.

Виходячи з вищевикладеного та врахувавши те, що для системи координат $\{X_M, Y_M, Z_M\}$ кут $\beta \geq 0$, $\pi/4 > (\beta+\alpha) \geq 0$, а знаки кутів α і μ визначаються знаками координат x_a і y_a, розрахунок координат точки об'єкта на місцевості буде таким:

$$tg\alpha = x_a / f,$$

$$tg(\beta+\alpha) = (tg(\beta) + tg(\alpha))/(1 - tg(\beta)\cdot tg(\alpha)),$$

$$tg(\beta+\alpha) = (f \cdot tg\beta + x_a)/(f - x_a \cdot tg\beta),$$

$$X_A = h \cdot tg(\beta+\alpha) - h \cdot tg\beta,$$

$$X_A = h \cdot ((f \cdot tg\beta + x_a)/(f - x_a \cdot tg\beta) - tg\beta)$$

$$tg\mu = y_a \Big/ \sqrt{x_a^2 + f^2},$$

$$Y_A = tg\mu \cdot \sqrt{X_A^2 + h^2},$$

$$Y_A = y_a \cdot \sqrt{X_A^2 + h^2} \Big/ \sqrt{x_a^2 + f^2}.$$

Із запропонованої схеми видно, що нам не відомі висота h і фокусна відстань f, а також кути γ і β. Координати X_A, Y_A і висота h, яка вимірюється при встановленні відеокамери, виражаються в метричній системі вимірювання довжин (відстаней). Оскільки координати проєкції точки a виражені в кількості пікселів, то й f зручніше виразити також у кількості пікселів, розрахувавши її за паспортними даними оптики відеокамери або визначивши експериментально для конкретної відеокамери.

Кути γ і β розраховуються відповідно до даних з наявних у смартфоні фізичних або синтетичних датчиків, наданих платформою Android. Показники синтетичних датчиків, яких фізично немає, визначаються операційною системою, виходячи з показань декількох фізичних датчиків. Наприклад, для обчислення кутів обертання в синтетичному «датчику обертання» використовуються показники акселерометра, гіроскопа, магнітометра, фізично вбудованих у смартфон. Нижче на рис. 2 показано результат роботи програми «Multi Clinometer» [5], яка в графічно-

му вигляді показує кут нахилу лінії візування відеокамери стосовно вектора сили тяжіння Землі та кут повороту відеокамери навколо лінії візування.

Смартфон оснащений також GPS-датчиком для визначення з певною точністю абсолютного положення користувача (довгота, широта, висота), а також засобами бездротового зв'язку GSM і Wi-Fi.

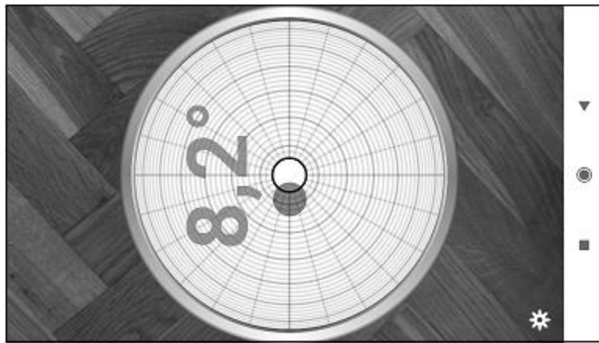


Рис. 2. Екранний інтерфейс програми «Multi Clinometer»

Точки на схемі, отримані для окремих послідовних кадрів відеопослідовності, позначають траєкторію руху об’єкта. Для визначення швидкості об’єкта достатньо поділити відстань між координатами кінців ділянки його прямолінійного руху на час, що відповідає кількості кадрів супроводу на цій ділянці. Чим більша ділянка, тим точніше розрахунки.

Робота системи відеодетектування швидкості ТЗ на базі смартфона

Для організації роботи системи відеодетектування прилад оснащується смартфоном з оболонкою, що захищає його від можливих механічних ушкоджень, впливу погодних умов (дощ, сніг), а також інфрачервоним прожектором і, за потреби, сонячною панеллю електроживлення. Прилад розміщують над дорожнім полотном або на узбіччі на висоті близько 10 метрів. Така висота не сильно впливає на точність обчислень і дозволяє робити знімки, на яких досить добре помітні номери автомобілів.

Схема роботи системи відеодетектування за допомогою виявлення й супроводу ТЗ передбачає таку послідовність дій.

1. Циклічне добування кадра з потоку відеоданих і перетворення зображення в відтінки сірого.
2. Попередня обробка отриманого статичного зображення відеокадра, що включає стабілізацію при можливих коливаннях приладу й усунення викривлень, пов'язаних з дисторсією.
3. Пошук положення всіх ТЗ на зображенні в зоні початку спостереження за ними й визначення для кожного координат точки, розташованої на їхній передній частині, оточення якої має найбільш гарні характеристики для супроводу.
4. Супровід знайдених точок до зони закінчення спостереження за ними.
5. Аналіз результатів супроводу по кожному об'єкту (оцінювання напрямку руху об'єкта на підставі траєкторії; розрахунок швидкості руху, виходячи з координат точок, отриманих у зонах початку й кінця спостереження при прямолінійному русі, або розбиваючи траєкторію на прямолінійні ділянки, за умови складного руху).
6. Передача засобами бездротового GSM-зв'язку результатів фотофіксації, даних про швидкість, координат розташування приладу, часу порушення в серверний центр для аналізу оператором і порівняння з даними з реєстрів. Якщо оператор підтверджує факт порушення ПДР, виписується постанова про накладення штрафу.

При реалізації наведеної схеми ядром системи є модулі пошуку й супроводу об'єктів. Далі зупинимося на деяких найпоширеніших методах пошуку й детальніше розглянемо алгоритм супроводу.

У [2] виконано досить повний огляд методів пошуку, класифікації й супроводу ТЗ. Виділимо деякі з них.

Методи пошуку положення ТЗ

Ціль пошуку – визначити наявність об'єкта на зображенні та знайти його положення в системі координат пікселів вихідного зображення. Положення об'єкта, залежно від вибору алгоритму, може ви-

значатися координатами прямокутника, що облямовує об'єкт або контуром цього об'єкта, або координатами набору точок, найбільш характерних для об'єкта. Розв'язання задачі пошуку об'єктів дозволяє аналізувати якісний склад сцени, а також одержувати інформацію про взаємне розташування об'єктів.

Складність задачі пошуку об'єктів на зображенні зумовлена багатьма причинами, серед яких можна виділити декілька основних: різноманітність форм і кольорів представників класу об'єктів, перекриття об'єктів, що детектуються, різний ступінь освітленості об'єктів, обумовлений часовими й погодними змінами.

Однією із загальних ознак, що характеризують ТЗ, особливо при розв'язанні задачі визначення швидкості, є рух. Задача виділення областей руху на відео – одна із класичних задач комп'ютерного зору, розв’язком якої є сукупність областей зображення, де відбувається рух одного або декількох об'єктів.

Найбільш простий підхід до розв'язання даної задачі полягає в тому, щоб використовувати механізм вирахування фону з кадра відео (background subtraction). Процедура вирахування, яка здійснюється над півтоновими зображеннями, передбачає, що для даного відео побудована модель фону, а також існує механізм відновлення моделі фону із часом. Вважається, що піксель належить об'єкту, якщо різниця інтенсивностей фону й поточного кадра для даного пікселя перевищує деяке граничне значення.

Інший розповсюджений підхід до розв'язання задач детектування областей руху – обчислення оптичного потоку (optical flow). Оптичний потік дозволяє визначити зсув кожного пікселя. Застосування даного підходу вимагає виконання двох основних умов:

– яскравість кожної точки об'єкта не змінюється з часом;
– найближчі точки, що належать одному об'єкту, у площині зображення рухаються зі схожою швидкістю.

У результаті вихідне завдання обчислення оптичного потоку зводиться до завдання мінімізації квадратичної помилки між інтенсивністю пікселів фрагмента зображення на попередньому кадрі та фрагментів, які послідовно шукаються на поточному кадрі. Дана процедура застосовується до кожного пікселя попереднього зображення, у результаті чого забезпечується побудова поля векторів зсуву всіх пікселів. Метод оптичного потоку також застосовується при розв'язанні задач стабілізації відео й супроводу об'єктів.

Ще однією помітною ознакою є наявність на ТЗ номерного знака. У 2001 році Паул Віола і Майкл Джонс запропонували метод для знаходження осіб з використанням примітивів Хаара. Алгоритм заснований на виявленні в кадрі наборів пікселів, що збігаються із заздалегідь підібраними примітивами, які складаються з білих і чорних прямокутників. Для розпізнавання різних об'єктів потрібний свій унікальний набір примітивів, який створюється шляхом навчання алгоритму на конкретному об'єкті. Правильно навчений алгоритм працює з високою ефективністю, проте сам процес навчання досить трудомісткий, вимагає добре організованої навчальної вибірки. Суть даного алгоритму в тому, що по зображенню рухається вікно, до якого по черзі прикладаються дані примітиви. У разі знаходження ознак, що підходять під умову задачі, дане вікно фіксується. Навчений каскад Хаара для завдання локалізації автомобільних номерів доданий в бібліотеку OpenCV. Це бібліотека алгоритмів обробки зображень, комп'ютерного зору й чисельних алгоритмів загального призначення. Використання низки змішаних класифікаторів [6] дозволило збільшити швидкодію алгоритму та ймовірність виявлення номерів автомобілів.

Для пошуку областей номерних знаків також є кілька навчених нейронних мереж, що дозволяють отримати більш, ніж 90% правильної локалізації номерних знаків.

Результатом процедури пошуку ТЗ є визначення координат центральної точки області зображення, розташованої на передній частині ТЗ, що рухається на камеру. Для уточнення положення точки, за допомогою процедури, наявної в бібліотеці Opencv, або іншої процедури, у її околиці визначають точку, оточення якої має найбільш гарні характеристики для супроводу.

Метод супроводу ТЗ

Згідно з наведеною схемою роботи системи детектування, стоїть завдання супроводу точки зображення, координати якої отримані на попередньому етапі. Для реалізації вибрано метод Лукаса-Канаде з урахуванням того, що точка на об'єкті стеження вже задана.

Алгоритм Лукаса-Канаде використовується досить широко в задачах оцінювання руху об'єкта [7, 8, 9]. Він відноситься до локальних методів обчислення оптичного потоку, оскільки обробляє пікселі в околиці певної точки.

Даний алгоритм передбачає, що:

a) зсув точок на поточному й попередньому зображеннях незначний;
b) зсув точок в околиці деякої точки однаковий;
c) значення інтенсивностей пікселів не змінюються в часі:

$$I(x,y,t) - I(x+\delta x, y+\delta y, t+\delta t) = 0,$$

де $I(x, y, t)$ − функція інтенсивності пікселя з координатами (x, y) у кадрі t і ($\delta x, \delta y$) – зміщення пікселя між послідовними кадрами t і $t+\delta t$.

Припустимо, що $D = \{q_1, q_2, ..., q_n\}$ − набір точок в околиці точки P.

Враховуючи мале зміщення при лінійному розкладанні функції для кожної з точок у ряд Тейлора, отримуємо систему рівнянь, яка розв’язується методом зважених найменших квадратів. Для визначення вагових коефіцієнтів для пікселів на зображенні, використовується функція $W(x, y)$. Відповідно до цього методу, для знаходження розв'язку необхідно мінімізувати помилку:

$$\varepsilon(\upsilon) = \sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot[I(x,y,t) - I(x+\delta x, y+\delta y, t+\delta t)]^2$$

$$\varepsilon(\upsilon) = \sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot\left(\frac{\partial I}{\partial x}\upsilon_x + \frac{\partial I}{\partial y}\upsilon_y + \frac{\partial I}{\partial t}\right)^2,$$

де $\upsilon = (\upsilon_x, \upsilon_y)$ − швидкість зсуву за відповідними координатами.

Для знаходження мінімуму помилки, необхідно прирівняти до нуля

$$\frac{\partial\varepsilon(\upsilon)}{\partial\upsilon_x},\ \frac{\partial\varepsilon(\upsilon)}{\partial\upsilon_y}.$$

У результаті отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases}\sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot[\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2\cdot\upsilon_x + \frac{\partial I}{\partial x}\cdot\frac{\partial I}{\partial y}\cdot\upsilon_y + \frac{\partial I}{\partial x}\cdot\frac{\partial I}{\partial t}] = 0\\ \sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot[\frac{\partial I}{\partial x}\cdot\frac{\partial I}{\partial y}\cdot\upsilon_x + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2\cdot\upsilon_y + \frac{\partial I}{\partial y}\cdot\frac{\partial I}{\partial t}] = 0\end{cases}$$

Ці рівняння можуть бути представлені в матричній формі $A\cdot\upsilon + B = 0$, де

$$A = \begin{bmatrix}\sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 & \sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot\left(\frac{\partial I}{\partial y}\frac{\partial I}{\partial x}\right)\\ \sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot\left(\frac{\partial I}{\partial x}\frac{\partial I}{\partial y}\right) & \sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2\end{bmatrix},$$

$$\upsilon = \begin{bmatrix}\upsilon x\\ \upsilon y\end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix}\sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot\left(\frac{\partial I}{\partial x}\frac{\partial I}{\partial t}\right)\\ \sum_{x,y\in D} W(x,y)\cdot\left(\frac{\partial I}{\partial y}\frac{\partial I}{\partial t}\right)\end{bmatrix}.$$

Отже $\upsilon = -A^{-1}\cdot B$.

Якщо за одиницю часу взяти проміжок між отриманням попереднього й поточного кадрів, то (υ_x, υ_y) − зміщення точки по відповідним координатам, яке не є цілим числом. Тобто, координати обчислюються в міжпіксельному просторі. Обрахування остаточних координат точки для поточного кадра здійснюється за ітераційною процедурою з визначенням проміжних зміщень точки та її координат. Значення інтенсивностей пікселів околиць початкової, остаточної й проміжних точок інтерполюються. Ітераційна процедура закінчуються при досягненні максимального

числа ітерацій або величини зміщення $\sqrt{\left(\upsilon_x^2+\upsilon_y^2\right)}$ менше заданої точності.

Даний алгоритм є простим і швидким, тому у багатьох випадках досить ефективним. Серед недоліків алгоритму слід зазначити, що його можна використовувати тільки в разі невеликих зсувів об'єкта між кадрами. Для усунення цього недоліку на практиці використовується пірамідальний метод Лукаса-Канаде.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено таке:

- застосування смартфонів з комплексом вбудованих технічних засобів і відповідним алгоритмічним і програмним забезпеченням у приладах відеофіксації швидкості ТЗ дозволяє реалізувати запропоновану технологію в повному обсязі;
- використання для реалізації супроводу методу Лукаса-Канаде з обчисленням у міжпіксельному просторі координат точок траєкторії руху ТЗ дозволяє підвищити точність вимірювання пройденого ТЗ шляху й, відповідно, зменшити відрізок траєкторії, на якому здійснюється вимірювання швидкості, в порівнянні з відомими методами відеофіксації;
- для установлення та первісного настроювання достатньо виміряти й увести в прилад висоту його розташування;
- порівняно низька вартість і енергоспоживання, можливість роботи в необхідному діапазоні температур, а також від сонячних батарей у денний час, за відсутності інших джерел електроживлення, дозволять організувати широкомасштабне впровадження приладу на дорогах України, за рахунок відносно невеликих інвестицій у розробку його механічної частини, алгоритмічного та програмного забезпечення.

Література

1. Б.С. Тимофеев, А.А. Мотыко. Измерение скоростей автомобилей путём анализа видеопоследовательности. *Информационно-управляющие системы*. 2012. № 1. С. 1–7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-skorostey-avtomobiley-putem-analiza-videoposledovatelnosti (дата звернення: 04.11.2020 р.).
2. Н.Ю. Золотых, В.Д. Кустикова, И. Б. Мееров. Обзор методов поиска и сопровождения транспортных средств на потоке видеоданных. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2012. 5(2). С. 348−358. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-poiska-i-soprovozhdeniya-transportnyh-sredstv-na-potoke-videodannyh (дата звернення: 04.11.2020 р.).
3. Любителям скорости посвящается: Что следует знать о запуске системы автофиксации нарушений ПДД. URL: https://zik.ua/ru/article/lyubitelyam_skorosti_posvyashhaetsya_chto_sleduet_znat_o_zapuske_sistemy_avtofiksacii_narusheniy_pdd_970302 (дата звернення: 04.11.2020 р.).
4. Разбор | 72 км можно! Все, что надо знать о системе видеофиксации нарушений ПДД. *ЛІГА.Tech*. URL: https://tech.liga.net/technology/cards/vse-chto-nado-znat-o-sisteme-videofiksatsii-narusheniy-pdd (дата звернення: 04.11.2020 р.).
5. Multi Clinometer-Home. URL: http://www.apps.physicssolutions.info/index_mobile.html (дата звернення: 04.11.2020 р.).
6. К.В. Мурыгин. Обнаружение автомобильных номеров на основе смешанного каскада классификаторов. *Штучний інтелект.* 2010. № 2. С. 147−152. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/56142/18-Murygin.pdf?sequence=1 (дата звернення: 04.11.2020 р.).
7. Е.А. Макарецкий, А.В. Овчинников, Нгуен Лием Хиеу. Телевизионные измерительные системы контроля скоростного режима дорожного движения. *Компоненты и технологии.* 2007. № 4. С. 34–37. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/televizionnye-izmeritelnye-sistemy-kontrolya-skorostnogo-rezhima-dorozhnogo-dvizheniya (дата звернення: 04.11.2020 р.).
8. Вычисление оптического потока методом Лукаса-Канаде [Электронный ресурс]. Многофункциональный сайт. URL: http://habrahabr.ru/post/169055 (дата звернення: 04.11.2020 р.).
9. В.П. Боюн, П.Ю. Сабельніков, Ю.А. Сабельніков. Пристрій обробки відеоданих для автоматичного супроводження об’єкта, визначеного у зображенні оператором. *Наука та інновації.* 2016, № 12(2). С. 29−39. doi: http://dx.doi.org/10.15407/scin12.02.029.

References

1. B.S. Timofeev, A. A. Motyko. Izmerenie skorostej avtomobilej putyom analiza videoposledovatel'nosti. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy* 2012. № 1. S. 1–7. URL:

https://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-skorostey-avtomobiley-putem-analiza-videoposledovatelnosti (data zvernennia: 04.11.2020 r.).
2. N.Yu. Zolotykh, V.D. Kustikova, I.B. Meerov. Obzor metodov poiska i soprovozhdeniya transportnykh sredstv na potoke videodannykh. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I Lobachevskogo.* 2012. 5(2). S. 348−358. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-poiska-i-soprovozhdeniya-transportnyh-sredstv-na-potoke-videodannyh (data zvernennia: 04.11.2020 r.).
3. Lyubitelyam skorosti posvyashchaetsya: Chto sleduet znat' o zapuske sistemy avtofiksacii narushenij PDD. URL: https://zik.ua/ru/article/lyubitelyam_skorosti_posvyashhaetsya_chto_sleduet_znat_o_zapuske_sistemy_avtofiksacii_narusheniy_pdd_970302 (data zvernennia: 04.11.2020 r.).
4. Razbor | 72 km mozhno! Vse, chto nado znat' o sisteme videofiksacii narushenij PDD. *LIGA.Tech.* URL: https://tech.liga.net/technology/cards/vse-chto-nado-znat-o-sisteme-videofiksatsii-narusheniy-pdd (data zvernennia: 04.11.2020 r.)
5. Multi Clinometer-Home. URL: http://www.apps.physicssolutions.info/index_mobile.html (data zvernennia: 04.11.2020 r.).
6. K.V. Murygin. Obnaruzhenie avtomobil'nykh nomerov na osnove smeshannogo kaskada klassifikatorov. *Shtuchnij intelekt.* 2010. № 2. S. 147−152. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/56142/18-Murygin.pdf?sequence=1 (data zvernennia: 04.11.2020 r.).
7. E.A. Makareckij, A.V. Ovchinnikov, Nguen Liem Khieu. Televizionnye izmeritel'nye sistemy kontrolya skorostnogo rezhima dorozhnogo dvizheniya. *Komponenty i tekhnologii*. 2007. № 4. S. 34–37. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/televizionnye-izmeritelnye-sistemy-kontrolya-skorostnogo-rezhima-dorozhnogo-dvizheniya (data zvernennia: 04.11.2020 r.).
8. Vychislenie opticheskogo potoka metodom Lukasa-Kanade [Ehlektronnyj resurs]. Mnogofunkcional'nyj sajt. URL: http://habrahabr.ru/post/169055 (data zvernennia: 04.11.2020 r.).
9. V.P. Boiun, P.Yu. Sabelnikov, Yu.A. Sabelnikov. Prystrii obrobky videodanykh dlia avtomatychnoho suprovodzhennia obiekta, vyznachenoho u zobrazhenni operatorom. *Nauka ta innovatsii.* 2016, № 12(2). S. 29−39. doi: http://dx.doi.org/10.15407/scin12.02.029.

Надійшла до редакції 18.12.2019

